



LATINMAG LETTERS

August 2020 - Volume 10 - Number 1
LL20-1001Rv

Published on behalf of the Latin American Association of Paleomagnetism and Geomagnetism by the Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

Semblanza histórica sobre el desarrollo del Paleomagnetismo y su impacto en la Paleogeografía y la Deriva Continental

Jaime H. Urrutia - Fucugauchi, Ligia Pérez - Cruz

22 páginas, 10 figuras

Latinmag Letters can be viewed and copied free of charge at:
<http://www.geofisica.unam.mx/LatinmagLetters/>

Papers contents can be reproduced meanwhile the source is cited

REVIEW PAPER



Published on behalf of Latin American Association of Paleomagnetism and Geomagnetism by the Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México

Semblanza histórica sobre el desarrollo del Paleomagnetismo, y su impacto en la Paleogeografía y Deriva Continental

Jaime Urrutia Fucugauchi^{1,2}, Ligia Pérez Cruz^{1,2,3}

¹ Programa Universitario de Perforaciones en Océanos y Continentes, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacan 04510, México

² Instituto de Investigación Científica y Estudios Avanzados Chicxulub, Parque Científico y Tecnológico de Yucatan, Sierra Papacal, Merida, Yucatan 97302, Mexico

³ Coordinación de Plataformas Oceanográficas, Coordinación de la Investigación Científica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacan 04510, Mexico

Abstract. Some iron-bearing minerals record the intensity and direction of Earth's magnetic fields acting as compasses by storing information on geological processes including mountain building and movements of continents and oceans. The Earth outer core, composed by iron and nickel, is where the geomagnetic field is generated due to convection currents. This inner field approximates to a geocentric axial dipole and provides a coordinate system useful for orientation on the Earth surface. Additionally, numerous studies document temporal changes in the geomagnetic field, including polarity reversals. Paleomagnetic studies have shown that these records are stable for millions of years. Paleomagnetic records allow us to use this reference system in different scales of space and time, permitting quantification of tectonic processes as well as the paleogeography of oceans and continents in the geological past.

Keywords: *Paleomagnetism, paleogeography, continental drift, tectonics, Earth's magnetic field*

Resumen. Algunos minerales de hierro en las rocas funcionan como brújulas, registrando la intensidad y dirección del campo magnético terrestre, de esta manera graban información sobre procesos geológicos, incluyendo la construcción de montañas y los movimientos de continentes y océanos. En el interior del planeta, las corrientes de convección del núcleo externo, compuesto por hierro y níquel, generan el campo geomagnético. Este campo interno se aproxima a un dipolo geocéntrico y axial y proporciona un sistema de coordenadas para orientarse en la superficie terrestre. Adicionalmente, los estudios documentan los cambios temporales del campo geomagnético, incluyendo los cambios de polaridad. Los estudios paleomagnéticos han mostrado que los registros son estables en escalas de millones de años. Los registros paleomagnéticos permiten emplear el sistema de referencia en diferentes escalas espacio-temporales que permite cuantificar los procesos tectónicos así como de la paleogeografía de los océanos y continentes en el pasado geológico.

Palabras clave: *Paleomagnetismo, paleogeografía, deriva continental, tectónica, campo magnético terrestre*



1 Introduction

En la década de los cincuentas, los estudios paleomagnéticos contribuyeron a reanalizar la teoría de deriva continental formulada a principios del siglo XX, demostrando que la distribución de océanos y continentes ha cambiado en el pasado geológico y que las reconstrucciones paleogeográficas son susceptibles de cuantificación. Con estos estudios se inició una unión entre paleomagnetismo y tectónica, que ha continuado proporcionando avances para entender la evolución del planeta, los procesos dinámicos y las interrelaciones del Sistema Tierra (litosfera, manto, núcleo, hidrosfera, atmósfera, ionósfera y criosfera). Análisis en contextos históricos han provisto reseñas y descripciones sobre el desarrollo y retos de los estudios (Glen, 1982; Irving, 1988; Frankel, 2012; Creer e Irving, 2012). En estas notas comentamos sobre el desarrollo del paleomagnetismo y la paleogeografía en sus etapas iniciales, incluyendo los estudios en Gondwana, margen continental oeste de Norte América y México.

La teoría de deriva continental se desarrolla a principios del siglo XX con la síntesis y análisis de datos geológicos, estructurales, paleontológicos y la similitud de las líneas de costa de los continentes (Wegner, 1915, 1929). Los modelos de deriva continental y desplazamientos horizontales fueron reanalizados y discutidos en las siguientes décadas. Las objeciones a la teoría incluyeron las diferencias de propiedades reológicas de las cortezas en continentes y océanos, fuerzas involucradas, tipos de deformación y rasgos estructurales asociados con movimientos verticales (Jeffreys, 1929). La teoría fue paulatinamente quedando relegada de las investigaciones geológicas, particularmente en los Estados Unidos y solo algunos estudios sobre deriva continental prosiguieron (Du Toit, 1927, 1937; Carey, 1955, 1958). En la década de los 50's, las investigaciones pioneras de registros paleomagnéticos reenfocaron el interés en la teoría y dieron un sustento cuantitativo a la deriva continental. Los registros paleomagnéticos en rocas de sitios en los diferentes continentes documentaron que las direcciones y posiciones polares para formaciones jóvenes, se agrupaban alrededor de la dirección del campo geomagnético o del eje geográfico, respectivamente. En contraste, los datos para formaciones más antiguas del Cenozoico, Mesozoico y Paleozoico, mostraban diferencias angulares, que aumentaban con la edad (Creer *et al.*, 1954). Los datos paleomagnéticos fueron inicialmente interpretados de formas diversas, incluyendo la posibilidad de cambios en el eje de rotación (referido como movimiento polar verdadero). La introducción del análisis, en términos de curvas de movimiento polar aparente y, la asociación con la teoría de deriva continental, condujo a las reconstrucciones paleogeográficas (Runcorn, 1956, 1962). Los estudios subsecuentes demostraron la validez de la teoría de la deriva continental y la existencia de los supercontinentes Pangea, Gondwana y Laurasia (Fig. 1). Con ello establecieron los métodos paleomagnéticos para cuantificar la deriva continental, que resultaron de gran importancia en el desarrollo de los modelos de formación de cadenas montañosas y reconstrucciones paleogeográficas (Irving, 1964).

En las siguientes décadas se acumuló evidencia en favor de la interpretación moviilística de los datos paleomagnéticos y se inició la documentación de las curvas de movimiento polar aparente, con la estimación de los polos paleomagnéticos en función de la edad relativa (Fig. 2). Las curvas permitieron obtener reconstrucciones sobre la distribución de océanos y continentes y sobre los procesos tectónicos



involucrados (Irving, 1964; McElhinny, 1973, Tarling, 1983). La integración de las evidencias de las dorsales meso-oceánicas y trincheras proveyó las bases para el modelo de Hess (1962) de evolución de océanos y continentes. Los modelos de convección del manto proveyeron mecanismos para los desplazamientos horizontales y deformación tectónica (Holmes, 1944; Hess, 1962). Las paleoreconstrucciones se basaron en la comparación de las curvas de movimiento polar aparente, las cuales representan los movimientos de deriva con respecto al eje de referencia paleomagnético del bloque o unidad continental u oceánica de la cual los datos paleomagnéticos han sido derivados. La hipótesis de que los polos paleomagnéticos proveen un sistema de referencia, que coincide con el geográfico constituye una de las suposiciones básicas en la aplicación del paleomagnetismo a problemas tectónicos (Runcorn, 1956, 1962; Creer *et al.*, 1957). Esta hipótesis es expresada en términos de que, las variaciones seculares del campo geomagnético pueden ser “promediadas”, de forma que el campo promedio representa el campo de un dipolo geocéntrico y axial.

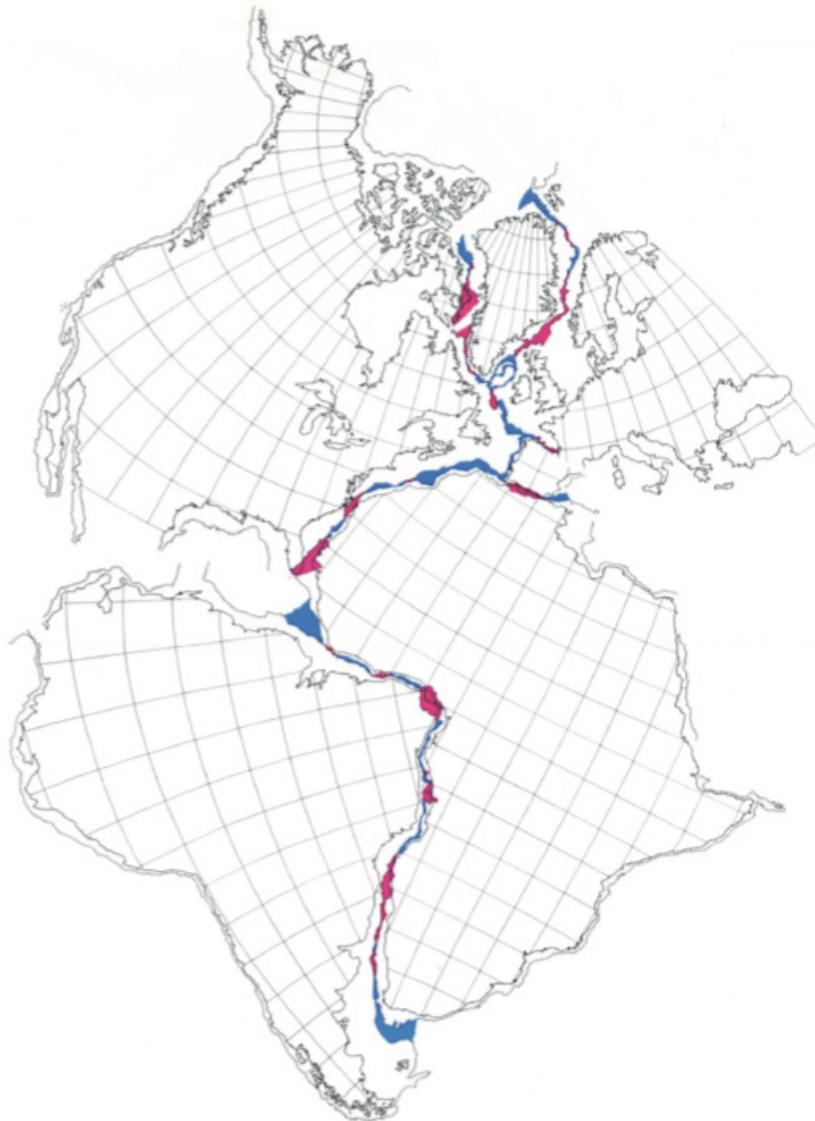


Figura 1. Paleoreconstrucción del supercontinente Pangea empleando cambio de curvatura del talud continental, con la clausura del Océano Atlántico. Las zonas marcadas en color representan traslapes y huecos en la reconstrucción (tomado de: Bullard *et al.*, 1965).



En los estudios iniciales del paleomagnetismo y magnetismo de rocas, adicionalmente se documentaron los cambios temporales del campo geomagnético en diferentes escalas, incluyendo los periodos largos de miles a millones de años (McDougall y Tarling, 1963; Glen, 1982). Los estudios documentaron los cambios de polaridad y reconstruyeron la escala de reversiones para los últimos millones de años, que fue empleada en la interpretación de las anomalías magnéticas marinas y la formulación de las teorías de crecimiento y esparcimiento de los fondos oceánicos y de la tectónica de placas (Vine y Matthews, 1963; Wilson, 1965; LePichon, 1968; Morgan, 1972; McElhinny, 1973). Las investigaciones sobre la tectónica de placas permitieron un desarrollo multidisciplinario comparable a los avances en otras disciplinas, con la introducción del sistema heliocéntrico, la evolución por selección natural, la biología molecular y la genética.

2 Campo Geomagnético Dipolar Geocéntrico y Axial

La hipótesis del campo geomagnético "promedio" (en intervalos del orden de 2-10 mil años) como campo dipolar geocéntrico y axial ha sido examinada para diversas épocas en diferentes estudios, a partir de comparaciones con datos que registran dependencia con la latitud y, por la evaluación de datos paleomagnéticos con las predicciones internas (Schneider y Kent, 1990). Por ejemplo, los datos paleomagnéticos expresados en términos de paleolatitudes equivalentes han sido comparados con indicadores paleoclimáticos (Irving, 1956). En particular se han comparado con los datos para las glaciaciones del Paleozoico, en donde las correlaciones concuerdan con la hipótesis (Irving, 1964). Las estimaciones paleomagnéticas de paleolatitud son consistentes con indicadores paleoclimáticos en depósitos glaciales, lechos rojos, evaporitas y arrecifes. En estos estudios pioneros, la resolución de los datos paleoclimáticos en las reconstrucciones paleogeográficas no permitía correlaciones de detalle, debido a incertidumbres en fechamiento y la complejidad de los sistemas que controlan el clima.

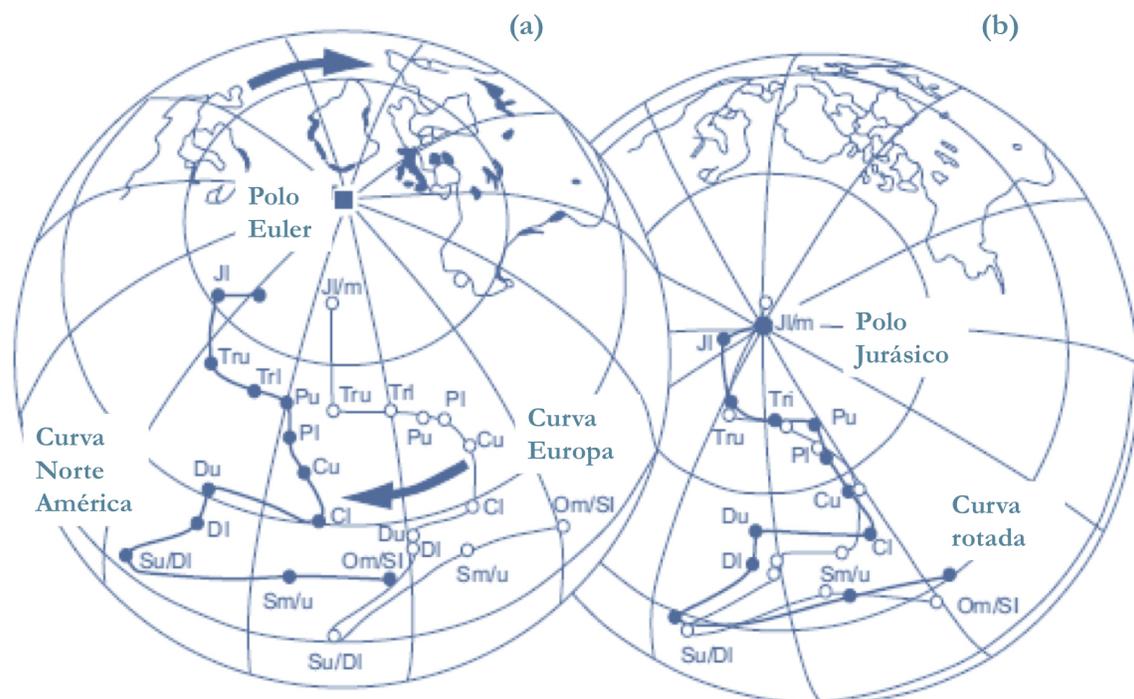
Evaluaciones con mayor resolución sobre la hipótesis del dipolo geocéntrico y axial fueron reportadas para los últimos millones de años. Opdyke y Henry (1969) examinaron datos de sedimentos marinos del Plioceno y Pleistoceno y compararon las inclinaciones observadas con las predicciones asumiendo un campo dipolar geocéntrico y axial. Merrill y McElhinny (1983) analizaron conjuntos de datos obtenidos de rocas volcánicas, con edades entre el presente y los 5 Ma, con lo que estimaron que el campo representa un dipolo geocéntrico y axial. Las incertidumbres o la desviación angular posible estimada por Merrill y McElhinny (1983) es del orden de unos 3 grados. Análisis similares para el Cenozoico y Mesozoico confirmaron que el campo paleomagnético corresponde con un campo dipolar y axial (Schneider y Kent, 1990). Análisis de las discrepancias han indicado que la diferencia angular disminuye si se asume un campo dipolar inclinado con respecto al eje de rotación, o bien si el dipolo es desplazado con respecto al centro. Este campo inclinado genera los efectos denominados campo desplazado y campo lejano, en donde se tiene una diferencia sistemática en la inclinación paleomagnética (Wilson, 1970). Los polos paleomagnéticos para los últimos 5 Ma están desplazados unos 3 grados pasando el polo geográfico sobre el meridiano magnético asociado a efectos del campo no dipolar, consistentes en periodos del orden de la variación paleosecular. Estas desviaciones angulares son menores a las asociadas con la incertidumbre de las determinaciones de



polos paleomagnéticos en el Cenozoico, Mesozoico y Paleozoico (Wilson, 1970; Merrill y McElhinny, 1983; Schneider y Kent, 1990).

3 Curvas de Movimiento Polar Aparente y Reconstrucciones Paleogeográficas

El método empleado en las reconstrucciones paleogeográficas se basa en la comparación de curvas del movimiento polar aparente, que representan secuencias en tiempo de las posiciones polares paleomagnéticas (Gordon *et al.*, 1984; Kent y May, 1987). En la Figura 2 se ilustran las curvas de movimiento polar correspondientes a Europa Occidental y Norte América, analizadas en los trabajos iniciales de Creer *et al.* (1954) y Runcorn (1956). Las curvas corresponden a los segmentos del Mesozoico y Paleozoico (aproximadamente entre el Jurásico y el Cámbrico-Ordovícico) referidas en el sistema geográfico de coordenadas. Puede observarse que las curvas presentan formas similares, lo que indica que sus desplazamientos (de deriva con respecto al polo paleomagnético y de aquí el eje de rotación terrestre) están asociados en el periodo examinado (Fig. 2a). Si las curvas se rotan alrededor del polo de rotación (polo de Euler), se obtiene una curva conjunta, en donde los polos para los diferentes periodos coinciden. En este estudio, se usa el polo de Euler que corresponde al polo de apertura del Atlántico Norte y se ha rotado a Europa Occidental, considerando fija a Norte América (Fig. 2 b).



Curvas de movimiento polar aparente

Figura 2. Curvas de movimiento polar aparente para Europa y Norte América. La reconstrucción se basa en el ajuste de las curvas de movimiento polar aparente rotadas alrededor de un polo de Euler situado cerca del polo geográfico (Creer *et al.*, 1954; Runcorn, 1956, 1962; Besse *et al.*, 1995).



Los datos paleomagnéticos se emplean en reconstrucciones paleogeográficas a partir del cálculo de paleolatitudes (Irving, 1964; McElhinny y Valencio, 1981). Las reconstrucciones pueden ser para (1) un tiempo particular utilizando polos de un rango de edad de los diferentes bloques; (2) un intervalo a partir de la comparación de las curvas de movimiento polar aparente determinadas de cada uno de los bloques (lo que refleja que estos compartieron una historia común en el periodo en que las curvas coinciden y hasta el tiempo en que las curvas divergen); y (3) diferentes intervalos por comparación de datos paleomagnéticos individuales con el segmento correspondiente a la edad en la curva de movimiento polar aparente.

La Figura 3 ilustra la curva polar para Gondwana, con los polos paleomagnéticos estimados para América del Sur, África, Australia, Antártica e India durante el Paleozoico y Mesozoico; estas masas continentales compartieron una historia común durante un largo periodo en el Paleozoico y principios del Mesozoico (hasta el Triásico-Jurásico). La curva delinea el sendero seguido por el polo sur. Los continentes en el periodo correspondiente se desplazaron sobre la zona polar, lo que resultó en una glaciación, cuyas evidencias pueden observarse en gran parte de Gondwana.

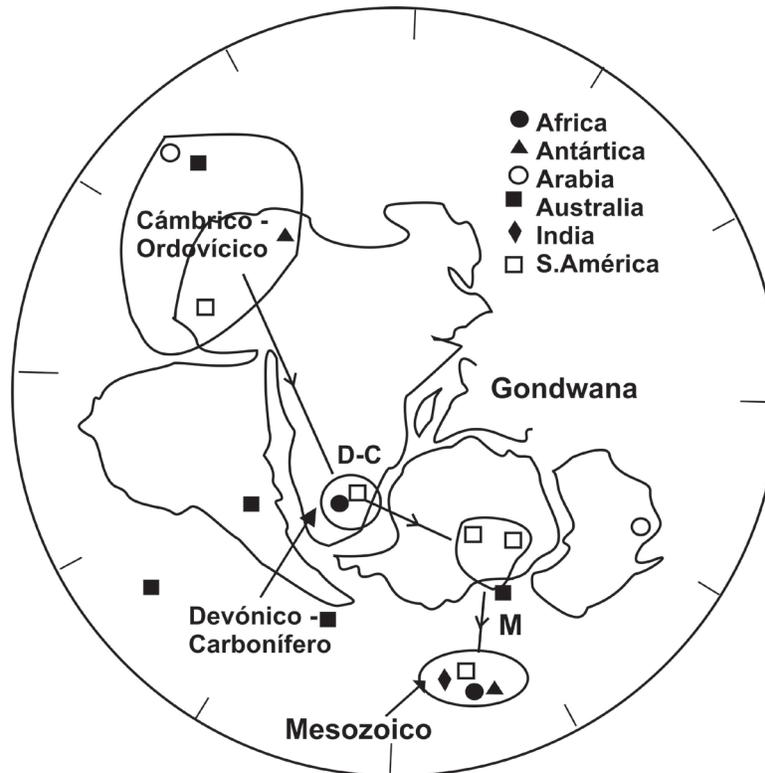


Figura 3. Curvas de movimiento polar aparente para Gondwana, con datos paleomagnéticos para Australia, África, Antártica, India, Arabia y Sudamérica graficados en la paleorreconstrucción de Smith & Hallam (1970) (modificado de McElhinny, 1973).

4 Rotación de Bloques, Orogenia y Terrenos

En la Figura 4 se ilustran estudios paleomagnéticos sobre rotaciones relativas de bloques de menores dimensiones (Irving, 1964; McElhinny, 1973). Las direcciones paleomagnéticas determinadas para el sector central de Europa son usadas como referencia para determinar posibles movimientos tectónicos de los



bloques situados al sur y oeste. Los datos paleomagnéticos indican que las direcciones correspondientes a España, Italia y las islas de Cerdeña y Córcega no coinciden con las direcciones esperadas extrapoladas de la porción norte-central de Europa. Las diferencias angulares son de 36 grados, 52 grados, 42 grados y 74 grados, todas en sentido contrario a las manecillas del reloj con respecto a la dirección esperada. Estas diferencias en la declinación magnética constituyen el registro de rotaciones de estos bloques en sentido contrario a las manecillas del reloj. En el caso de España, la rotación para lograr la coincidencia de las direcciones cierra el Golfo de Vizcaya (Van der Voo, 1969). El Golfo de Vizcaya se origina por la rotación de la península Ibérica desde una paleoposición adyacente a la costa de Francia, lo que está de acuerdo con los estudios de anomalías magnéticas marinas realizados en la región. Las rotaciones de la península Itálica y las islas de Córcega y Cerdeña están relacionadas con la separación del continente africano después de la colisión que formó el cinturón orogénico de los Alpes, al cierre del paleo-océano de Thetys.

Otro ejemplo de la aplicación del método paleomagnético es la rotación del archipiélago de Japón (Irving, 1964). Los estudios paleomagnéticos realizados en los sectores norte y sur de la isla de Honshu indican discrepancias angulares en las direcciones medias, las cuales forman un ángulo entre ellas de 58 grados. Al rotar el segmento sur respecto al norte (o viceversa) por un ángulo de 58 grados, tomando como división a la falla en la parte central de la isla, se tiene que las direcciones paleomagnéticas coinciden. Estos datos han sido interpretados en términos de una rotación (o arqueamiento) del archipiélago japonés durante la formación del Mar de Japón y la separación de estas islas de la parte continental de Asia.

5 Sistema de Referencia de Plumitas del Manto

La secuencia de polos en la curva de movimiento polar aparente proporciona la información cuantitativa para determinar los movimientos de las placas. Las curvas de movimiento polar aparente proveen un sistema

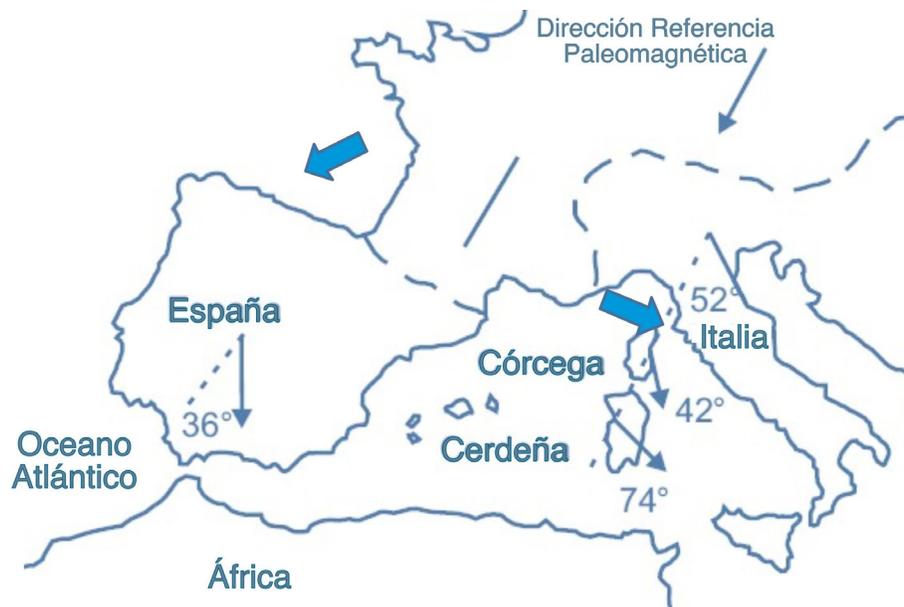


Figura 4. Estudios paleomagnéticos en reconstrucciones paleogeográficas y problemas tectónicos. Rotación de la península Ibérica, península Itálica e islas de Córcega y Cerdeña (tomado de: McElhinny, 1973).



de referencia, el cual fue posteriormente evaluado empleando otros indicadores cinemáticos de movimiento de placas. En el diagrama se muestra un ejemplo para una placa M de litósfera oceánica cuyos límites están formados por una dorsal, dos fallas transformadas y una trinchera. La curva de movimiento polar aparente marca la rotación de la placa alrededor del polo de Euler correspondiente, en donde cada posición polar (entre los 80 Ma y el reciente) corresponde a un segmento de círculo mayor (meridiano) sobre la placa. La curva de polos puede visualizarse como el camino seguido por la placa en reversa (Fig. 5).

El sistema de referencia de plumas del manto permite cuantificar los movimientos de placa (Morgan, 1972, 1983). Un ejemplo del sistema de plumas de manto está indicado esquemáticamente por los triángulos y trapecios, que representan volcanes activos (triángulo a los 0 Ma) e inactivos (trapecios). Este tipo de

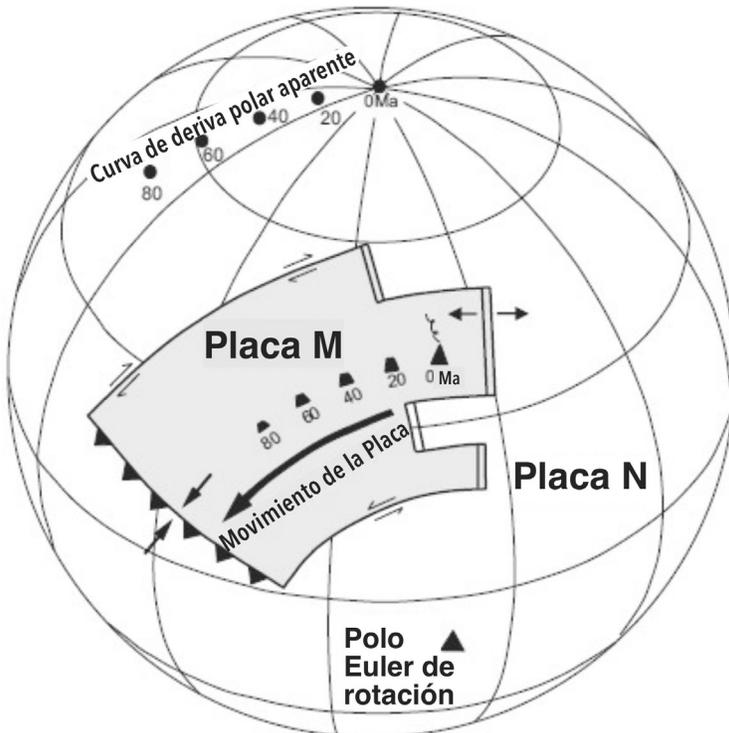


Figura 5. Representación esquemática de la relación entre la curva de movimiento polar aparente y el movimiento de placa alrededor de un polo de Euler. En la figura se ilustra el sistema de referencia de los puntos calientes o plumas del manto, indicado por la cadena volcánica marcada con los trapecios y el triángulo (modificada de Gordon *et al.*, 1984).

volcanismo intraplaca está relacionado con la actividad interna de la anomalía térmica creada por un punto caliente (plumas del manto), que representa material a alta temperatura que asciende en el manto. Los puntos calientes marcan los movimientos de la placa, en forma similar a una vela sobre la cual se pasa una hoja de papel. Conforme la placa es desplazada el efecto asociado a la anomalía térmica disminuye y la placa se enfría, se vuelve más densa y se hunde, por lo que volcanes que estaban emergidos son cubiertos por el agua y erosionados. Este proceso fue propuesto por Tuzo Wilson para explicar la formación de los montes marinos que presentan sus cimas en forma de meseta (Wilson, 1963). Uno de los ejemplos es la pluma asociada con la cadena volcánica de Hawaii-Emperador en el Océano Pacífico. La actividad volcánica reciente está concentrada en la isla de Hawaii, que forma el extremo activo asociado con el punto caliente. El extremo más antiguo está representado por los montes marinos cerca de la península de Kamchatka, cuyas edades son de alrededor de 78 Ma. La cadena ha registrado el movimiento de la placa Pacífico. Los puntos calientes pueden considerarse fijos con respecto al manto inferior y proporcionan un sistema de referencia



alternativo; los movimientos relativos entre puntos calientes es pequeño en comparación con la magnitud de los movimientos de placa.

6 Inversiones de Polaridad, Magnetoestratigrafía y Anomalías Magnéticas Marinas

Una de las variaciones del campo paleomagnético en periodos largos es la que corresponde con los cambios de polaridad (McDougall y Tarling, 1963; Wilson y Haggerty, 1966). Estos cambios de polaridad se caracterizan por distribuciones estadísticas Poisson o Gama y definen crones de polaridad de diferente duración y han constituido una característica del comportamiento del campo paleomagnético en periodos largos. Los estudios han identificado la ocurrencia de épocas con un comportamiento distinto en cuanto a la frecuencia de inversiones, en el Cretácico Medio-Tardío y Permo-Carbonífero (Merrill y McElhinny, 1983; Tarling, 1983). Los dos supercrones corresponden con periodos de polaridad predominantemente normal e inversa, respectivamente.

Las características espaciales del campo dipolar permiten identificar de manera sencilla a los hemisferios, ya que en el campo de polaridad normal (actual) se tiene que la inclinación magnética es hacia arriba de la horizontal en el hemisferio sur y hacia abajo de la horizontal en el hemisferio norte. En el

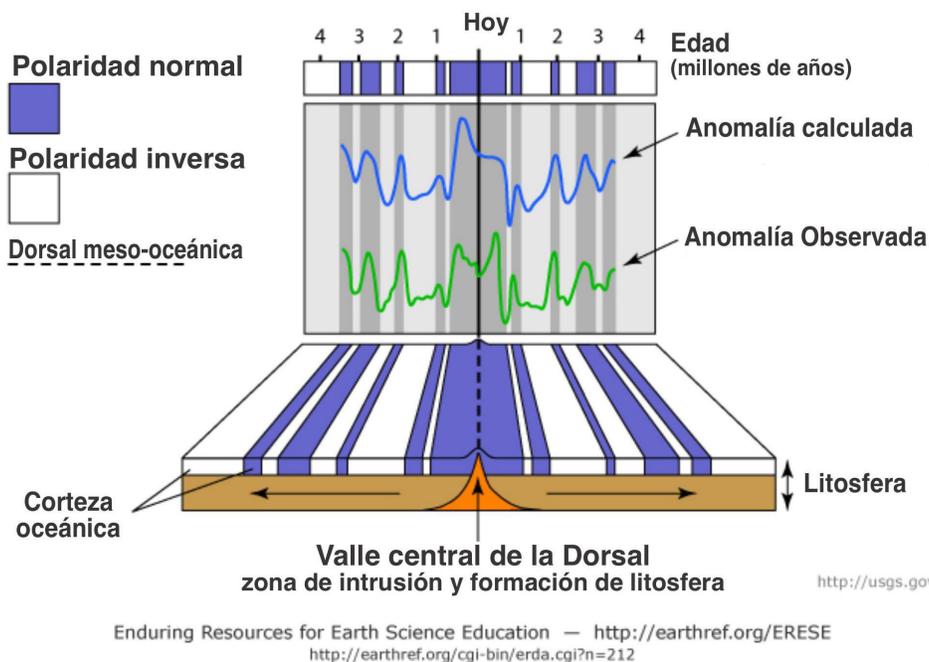


Figura 6. Representación esquemática de la correlación de anomalías magnéticas marinas y escala de cambios de polaridad (tomado de: US Geological Survey, ERESE <http://earthref.org>).

campo de polaridad inversa se tiene la configuración opuesta. Para los estudios paleogeográficos se requiere por lo tanto conocer la polaridad para poder determinar el hemisferio y asignar la paleolatitud a norte o sur y estimar los desplazamientos angulares. Para el Cenozoico y parte del Mesozoico, este problema es solucionado de forma relativamente sencilla por correlación con los datos de anomalías magnéticas marinas (Vine y Matthews, 1963). La formación de corteza oceánica en las dorsales meso-oceánicas adquiere una magnetización termoremanente que registra la dirección y polaridad del campo magnético (Fig. 6). Con ello



es posible determinar la edad de la corteza oceánica y estimar direcciones y cocientes de movimiento de las placas oceánicas. Los patrones de las bandas de anomalías magnéticas y las paleoreconstrucciones permiten calibrar los datos paleomagnéticos en periodos largos de decenas de millones de años y en términos de hemisferio. Este método sin embargo no es aplicable cuando no se dispone del patrón de anomalías debido a los procesos de subducción y reciclaje de la corteza oceánica. En estos casos se tiene ambigüedad en la paleolatitud. Para épocas anteriores al Jurásico no se dispone de la información de las anomalías magnéticas marinas.

7 Paleomagnetismo y Cinturones Orogénicos

La interpretación de resultados paleomagnéticos en términos de procesos orogénicos en general plantea dificultades (Van der Voo y Channell, 1980). Los polos y las direcciones paleomagnéticas en zonas deformadas divergen de los definidos para formaciones en los cratones. Estas divergencias angulares generaron discusión en las interpretaciones de las curvas e implicaciones sobre la deriva. Ese fue el caso con los estudios en las margenes este y oeste de Norte América. La margen este de Norte América se caracteriza por cinturones plegados de edad Paleozoica, asociados a colisión de placas en la clausura del paleo-océano Atlántico en el Paleozoico, (Wilson, 1966; Dewey y Bird, 1970). Investigaciones paleomagnéticas (Irving, 1964, 1979; Van der Voo y French, 1977) muestran que las curvaturas en el cinturón orogénico de los Apalaches son primarias y no se ajustan al modelo de oroclinal (Carey, 1958). Por otro lado, estudios han permitido delinear antiguas zonas de fallas transformadas y posibles suturas. Kent y Opdyke (1979) reportaron la ocurrencia de una zona de desplazamiento lateral en la sección norte del cinturón orogénico de los Apalaches. Otros estudios han detectado rotaciones tectónicas de unidades estructurales y cuerpos ígneos intrusivos dentro del cinturón orogénico. Investigaciones paleomagnéticas aportan evidencias en contra de posibles movimientos tectónicos, tal es el caso de la porción oeste de Newfoundland, la cual aparentemente no se ha movido apreciablemente con respecto al cratón de Norte América.

En la margen oeste de Norte América la situación es distinta; investigaciones paleomagnéticas reportaron direcciones de magnetización y posiciones polares anómalas (Cox, 1957) las cuales documentan la deformación del cinturón orogénico cordillerano (Carey, 1958). Los resultados paleomagnéticos implican la ocurrencia de rotaciones tectónicas de las áreas con respecto a la parte cratónica de Norte América (Irving, 1964, 1988; Beck, 1980). Las investigaciones paleomagnéticas en el cinturón orogénico han aportado una gran cantidad de información; la cual ha confirmado la ocurrencia de direcciones de magnetización que se desvían de las esperadas para las partes estables de Norte América. En general las direcciones paleomagnéticas presentan declinaciones que se desvían en el sentido de las manecillas del reloj con respecto a las declinaciones esperadas, e inclinaciones menores a las esperadas, ello con respecto a los valores calculados considerando las áreas estudiadas fijas con respecto al cratón. La consistencia de los resultados paleomagnéticos condujo a debates sobre la causa e interpretación de las desviaciones angulares en las direcciones y los polos magnéticos. Las interpretaciones incluyen:

- 1) Efectos del campo magnético, tales como variación secular, excursiones, transiciones de polaridad



y efectos de campos multipolares (Irving, 1964; Tarling, 1983).

2) Movimientos estructurales locales, asociados con intrusiones que registran cambios de inclinación respecto a la horizontal, acompañados por rotaciones con respecto a ejes verticales.

3) Movimientos tectónicos de carácter regional, involucrando desplazamientos al norte del orden de mil kilómetros y rotaciones en el sentido de las manecillas del reloj (Beck, 1980; Irving, 1979).

Respecto a la posición polar, la desviación de los polos paleomagnéticos es a la derecha de la curva del movimiento polar aparente para la parte estable (cratón) de Norte América y con colatitudes mayores a la colatitud geográfica de los lugares estudiados. La mayor parte de los polos anómalos están desviados dentro de un sector del Océano Atlántico del Norte. Las evidencias sobre una causa tectónica incluyen la consistencia en el sentido de la desviación en las diferentes localidades geográficas a lo largo de la margen occidental de Norte América y la distribución aparente en la magnitud y tipo de la desviación. Asumiendo que la causa es tectónica, asociada con desplazamientos hacia el norte, las unidades más antiguas presentan cambios en latitud (inclinación) mayores que las presentadas por unidades más jóvenes que se desplazan distancias más cortas. En términos generales, esto es lo que se observa (Beck, 1980). Algunos casos requieren que secciones de la cordillera estuvieron sujetas a regímenes tectónicos con desplazamientos mayores (caso de Alaska y la Columbia Británica).

Las propuestas de movimiento de bloques (terrenos tectonoestratigráficos) y aloctonía en la cordillera han influido en los modelos geológicos. Estudios como los reportados por Coney *et al.* (1980) indican que cerca del 70% de la Cordillera Norteamericana se compone de terrenos cuyas relaciones paleogeográficas no son compatibles con los terrenos adyacentes de Norte América. La mayoría de los terrenos presentan asociaciones con corteza oceánica y aloctonía, incluyendo largos desplazamientos horizontales. Los estudios en la parte norte de Canadá y Alaska indican que la deformación y estructuras se asocian con eventos de colisión y efectos en el interior de la placa de Norte América. En la margen se han detectado fallas laterales, las cuales han jugado un papel preponderante desde el Jurásico Medio. Con respecto al sector sur de la Cordillera Norteamericana; estudios sobre terrenos alóctonos por Coney *et al.* (1980), sugieren que parte de México se acrecionó al cratón de Norteamérica. Los argumentos paleomagnéticos concuerdan con estudios en secuencias sedimentarias y lavas con control estructural y stratigráfico, incluyendo la traslación del bloque de la Costa de Oregon (Oregon Coast Range; Simpson y Cox 1977).

La interpretación de los datos paleomagnéticos en zonas de deformación emplea la comparación de direcciones, permitiendo cuantificar la ocurrencia de rotaciones a lo largo de ejes verticales y desplazamientos latitudinales de una manera sencilla (Beck, 1980). El método involucra el cálculo de la dirección esperada o de referencia a partir de los datos de las curvas de movimiento polar aparente o de una posición polar que se emplea como referencia. Los datos observados (D_o , I_o) se comparan con los estimados (D_x , I_x) y a partir de ello se calculan los parámetros de rotación (R) y de cambio latitudinal (F), los cuales están definidos por:

$$R = D_x - D_o$$

$$F = I_x - I_o$$



En la Figura 7 se ilustra esquemáticamente su uso para estimar rotaciones de bloques, en el caso de la península de Baja California, donde los estudios paleomagnéticos en la península indican la posibilidad de rotaciones y traslaciones asociadas con la reestructuración de movimientos de placas y desarrollo del sistema de centros de expansión y fallamiento transforme en la frontera de placas Pacífico-Norte América.

En el caso de México, el análisis de los resultados paleomagnéticos y tectónicos documenta una configuración de "bloques" con distintas historias y tiempos de agregación, que van del Paleozoico al Cenozoico. La extensión inferida del cratón de Norte América abarca el sur de estados Unidos y norte de México, coincidiendo con el cinturón orogénico de Ouachita. Las áreas rodeando a los cratones

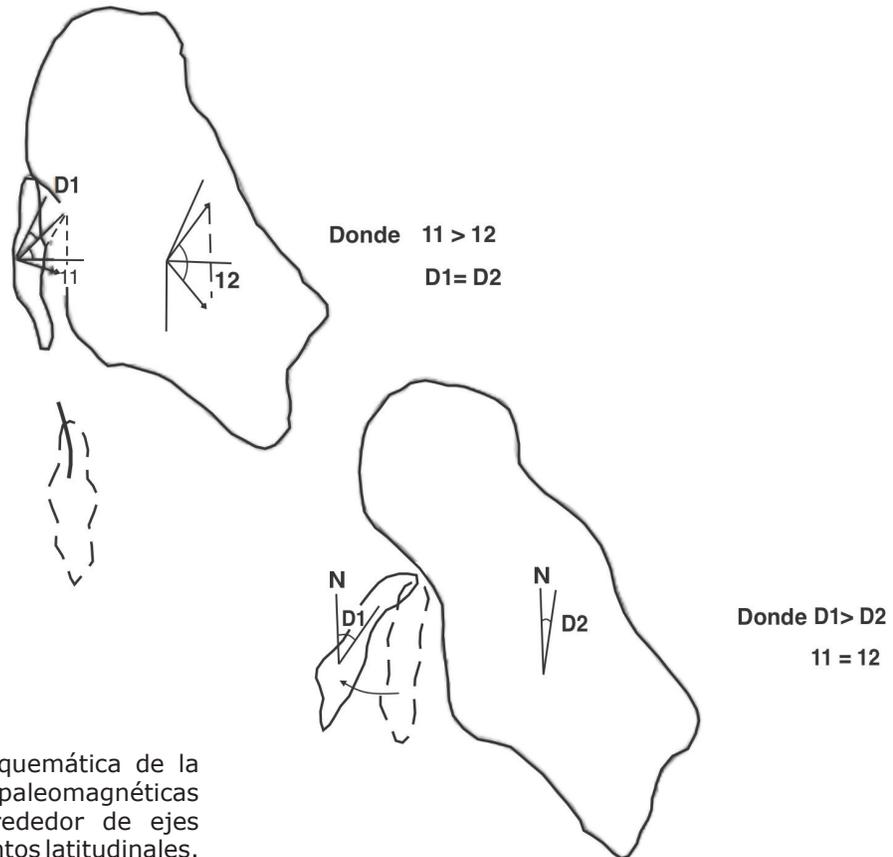


Figura 7. Representación esquemática de la comparación de direcciones paleomagnéticas para estimar rotaciones alrededor de ejes verticales y para desplazamientos latitudinales.

constituyen cinturones orogénicos agregados al área estable en diversos períodos y en donde los más externos generalmente son los más jóvenes. Investigaciones paleomagnéticas en estas áreas han indicado la ocurrencia de movimientos tectónicos, proporcionando evidencias y datos sobre el proceso orogénico y la historia de los terrenos alóctonos, antes de su agregación al cinturón orogénico (Van der Voo y Channell, 1980).

8 Estudios Paleomagnéticos y Evolución Tectónica de México

El estudio del origen y evolución del Golfo de México y áreas continentales adyacentes, ha atraído la atención desde hace tiempo. Antes de la aceptación de las teorías de desplazamientos horizontales, Carey



(1958) propuso un modelo involucrando movimientos horizontales de una serie de bloques, los cuales se encontraban ocupando el espacio del Golfo. Posteriormente, se propusieron modelos basados en Carey (1958), agrupados aquí como modelos de micro-bloques (Dietz y Holden, 1970; Freeland y Dietz, 1971).

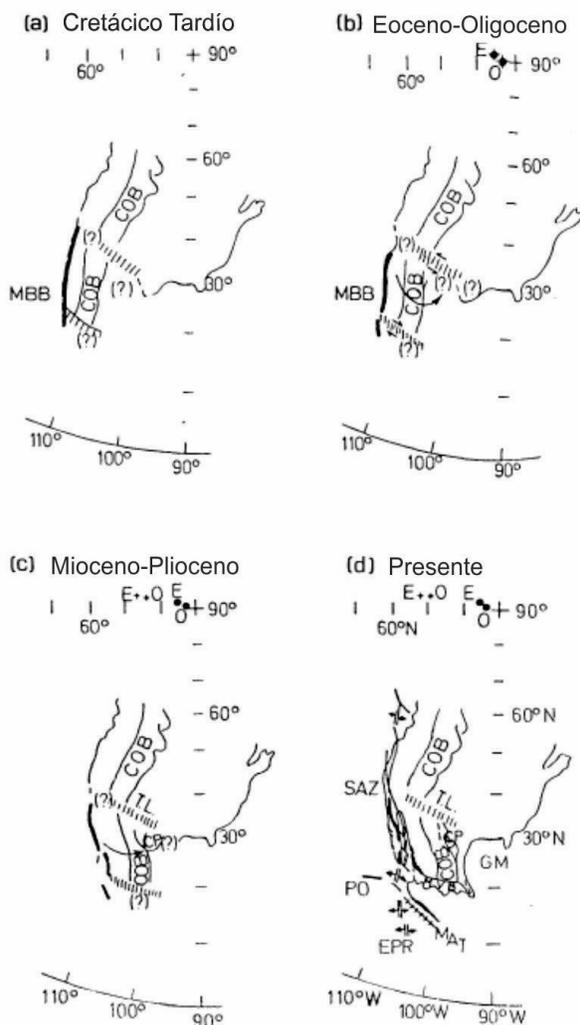
Estudios de paleorreconstrucción de las masas continentales, antes de la apertura del Océano Atlántico, han puesto de manifiesto que ciertas partes de México y Centro América debieron haber estado ocupando posiciones relativas diferentes a las actuales (Carey, 1958; Bullard *et al.*, 1965). El modelo presentado por Bullard *et al.* (1965) para el Océano Atlántico central y Mar Caribe implica que el sur de México (a partir aproximadamente del Eje Volcánico Trans-Mexicano), debió haber estado localizado en otra posición. Posteriormente se han propuesto otros modelos, basados en análisis de alineaciones de zonas mayores de fracturamiento o en análisis de fósiles marinos del Carbonífero y del Pérmico (Walper y Rowett, 1972). Por otro lado, utilizando datos paleomagnéticos para las grandes masas continentales, América del Norte, América del Sur, África y Europa (Van der Voo y French, 1974), se ha propuesto una reconstrucción que cierra el Golfo de México y que implica que todo México debió haber estado localizado en otra posición (Van der Voo *et al.*, 1976), al oeste de la actual. En apoyo a este tipo de reconstrucción de modelos de macrobloques (o de placas), se tienen varios argumentos paleontológicos y geológicos (Walper y Rowett, 1972; Pilger, 1978; Walper, 1980) y estudios en México que documentan zonas de falla de desplazamiento lateral izquierdo (Silver y Anderson, 1974; de Cserna, 1969; Walper, 1980; Urrutia, 1979, 1981, 1984). Entre las incógnitas se tiene que identificar el arco magmático Paleozoico en las márgenes de las placas Americanas. Una posibilidad es que este arco esté cubierto por rocas Mesozoicas o Cenozoicas, por ejemplo en el talud continental norte del Golfo de México, o bien, que el movimiento inicial que colocó a las placas de América del Norte y del Sur en contacto, haya sido predominantemente lateral. La otra opción es que el arco magmático se hubiese localizado en el noreste de México, en donde se tienen indicaciones de ambientes tipo arco.

El origen y evolución del Golfo de México, Mar Caribe y Océano Atlántico Central es importante en los estudios de paleorreconstrucciones (Fig. 1). En general, modelos tipo Bullard *et al.* (1965) son similares a los modelos propuestos años atrás. Wegener (1929) propuso que Pangea permaneció relativamente estable por cerca de 200 millones de años, del Carbonífero al Cretácico. Esta propuesta de una Pangea estable ha sido incorporada en modelos como los de Scotese *et al.* (1979). Morel e Irving (1981) reportaron que los datos paleomagnéticos disponibles no apoyan a una Pangea estable por largos períodos de tiempo. En particular, Morel e Irving proponen que Pangea (Pangea A) existió durante el Jurásico Temprano-Medio (190 a 170Ma) o quizá desde el Triásico Tardío (200 a 170 Ma.) y que antes los bloques derivaron de forma similar a la documentada durante el Cenozoico. Para el Carbonífero Tardío-Pérmico Temprano (aproximadamente entre 290 y 260 Ma.), Morel e Irving (1981) proponen la existencia de otro supercontinente, denominado Pangea B. La transición entre B y A no está documentada y se propone que ocurrió por movimiento lateral derecho (3,500 km) entre Laurasia y Gondwana, durante el Pérmico y el Triásico. De aquí que no se tuvo océano entre América del Norte (Laurasia) y América del Sur (Gondwana). Por otro lado, estos argumentos no apoyan una unión entre América del Norte y América del Sur, tal que el Golfo de México quede cerrado.



Los modelos han sido analizados usando datos paleomagnéticos de Centro América, Antillas y México, que apoyan modelos moviilísticos, con la formación del Golfo de México durante el Jurásico medio. Los datos paleomagnéticos (Van der Voo *et al*, 1976) permiten descartar modelos, tales como aquellos en que el Golfo representa el remanente de un océano Paleozoico (Cebull y Shubert, 1980) y propuestas de basificación de corteza continental. Los estudios estructurales han documentado los efectos de la orogenia Laramide, Mesozoica-Cenozoica, dentro del sistema orogénico Cordillerano de Norte América. En la sección anterior se mencionó que parte de la Cordillera de Norte América (margen oeste de Estados Unidos y Canadá) fue afectada por colisión de bloques y movimientos tectónicos de rotación. Las tendencias estructurales de estas fases orogénicas post-Paleozoicas se extienden en México (Urrutia, 1981); lo que ha conducido a proponer movimientos similares (Van der Voo y Channell, 1980).

Con la separación de Norteamérica y Sudamérica y la formación del Atlántico central se abrieron espacios para la acreción de México y Centroamérica. La deformación tectónica es dominada por desplazamiento hacia el norte y rotaciones en sentido de las manecillas del reloj, así como por movimientos



laterales izquierdos (Fig. 8). Las posiciones polares para el Mesozoico y Cenozoico Temprano de México muestran desviaciones angulares con respecto a la curva de movimiento polar aparente del cratón de Norte América con polos desplazados en el Atlántico Norte (resultados del margen occidental de Norte América). Los datos paleomagnéticos para México no concuerdan con este modelo tectónico, lo que plantea un problema de interpretación para el extremo sur del cinturón orogénico cordillerano de Norte América. En la Figura 9 se ilustran dos modelos de paleoreconstrucción para los periodos Carbonífero temprano (340Ma) y Pérmico (250Ma) para el arreglo de los continentes de América del Norte y del Sur, en que se explora la paleoposición de terrenos de México y Centro América.

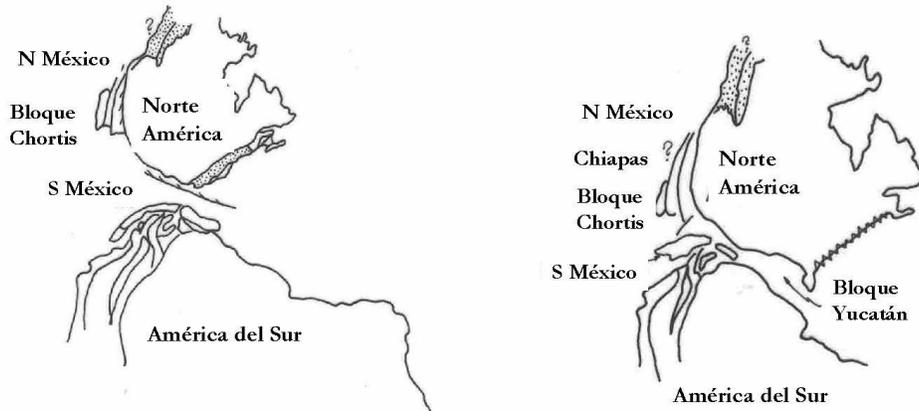
Los modelos de evolución de las placas de litósfera oceánica en los océanos e interacciones con los continentes, permiten calibrar los sistemas de paleocoordenadas. Los estudios de la convergencia y subducción de las placas oceánicas en la zona del Pacífico permitió integrar

Figura 8. Modelo de evolución para México basado en datos paleomagnéticos (Urrutia, 1981).



Carbonífero Temprano

~ 340 m. y.



Pérmico

~ 250 m. y.

Figura 9. Palaeoreconstrucción durante el Paleozoico. (a) Carbonífero Temprano (340 Ma) y (b) Pérmico (250 Ma).

la información geológica sobre las extensas provincias volcánicas y zonas de tectónica extensional con los datos geofísicos de anomalías magnéticas marinas y zonas de fallamiento. La deformación y actividad magmática abarcó una extensión considerable en la margen, resultado de la subducción e interacción de placas oceánicas en el Pacífico (Coney *et al.*, 1980; Urrutia, 1978). Diferentes factores como la reología de la placa continental, ángulo de subducción, edades relativas de las placas y cociente de convergencia contribuyeron al desarrollo del cinturón orogénico. La re-organización de los movimientos relativos de placas y patrones de convergencia variaron a lo largo de la margen occidental.

9 Reflexiones y Comentarios

Los estudios paleomagnéticos proveyeron la evidencia a la teoría de deriva continental, para cuantificar los movimientos y las paleoreconstrucciones de océanos y continentes. Adicionalmente, los estudios paleomagnéticos revelaron los cambios del campo geomagnético en escalas de miles a millones de años, incluyendo los cambios de polaridad. La documentación de estos cambios temporales permitió la construcción de las escalas de polaridad geomagnética, proporcionando una escala de referencia para la estratigrafía y la tectónica. Su aplicación a la interpretación de las anomalías magnéticas en los océanos permitió analizar los procesos de expansión de los fondos oceánicos, estimar los movimientos de placas y la edad de la litosfera oceánica. Estos estudios contribuyeron al desarrollo de la teoría de tectónica de placas.

Las curvas de movimiento polar en los inicios se analizaron por posibles efectos de desplazamiento del eje de rotación y de ahí se reconocieron los efectos de la deriva continental (Creer *et al.*, 1954; Runcorn, 1956, 1962; Kent y May, 1987). Las objeciones y problemas planteados sobre la deriva continental eran fundamentados e incluyeron análisis de propiedades reológicas de las rocas en la corteza continental y oceánica, estado de esfuerzos y la cinemática y dinámica del desplazamiento de masas continentales



(Jeffreys, 1929). El desarrollo de métodos de campo y laboratorio, pruebas de estabilidad de los registros paleomagnéticos, análisis estadístico y construcción de las curvas de movimiento polar aparente, permitió interpretaciones de mayor detalle y resolución para los modelos de paleoreconstrucción en un contexto mobilista (Irving, 1964; Tarling, 1983).

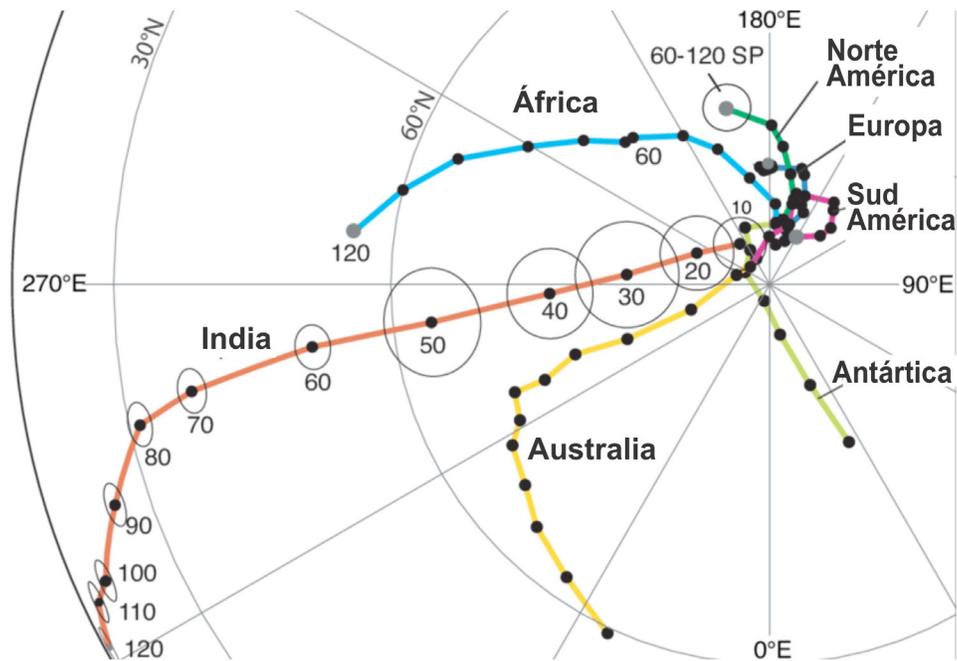
Los estudios sobre la evolución tectónica y paleogeográfica de América del Sur y Centro América tuvieron un papel importante en el desarrollo de la deriva continental y la tectónica de placas. Los estudios paleomagnéticos se realizaron en múltiples sitios en los diferentes continentes, con el establecimiento de laboratorios en Reino Unido, Francia, Estados Unidos, Unión Soviética, Sudáfrica, Australia, India, Japón y Latinoamérica. Los análisis sobre la similitud de las líneas de costa, continuidad de rasgos estructurales y registro fósil aportaron evidencias sobre las relaciones tectónicas (Wegner, 1915; Carey, 1955; Bullard *et al.*, 1965). Los antecedentes y desarrollos del paleomagnetismo en América Latina han sido analizados en Urrutia (2012), Vilas (2013) y Pacca (2014), entre otros. Los estudios en América del Sur contribuyeron a resolver el amalgamiento y evolución de Gondwana, con el proceso de fragmentación, formación del Océano Atlántico y deriva (Creer, 1958; Valencio y Vilas, 1970; Vilas y Valencio, 1970; Tarling, 1971; Smith y Hallam, 1970; Valencio, 1974; Rapalini *et al.*, 1989).

Los cambios de paradigma se han asociado a las revoluciones científicas (Kuhn, 1962). En un contexto histórico las revoluciones se han asociado con el desarrollo del método científico en las ciencias experimentales y la emergencia de las ciencias físicas, astronomía, biología, química y matemáticas. En este contexto el desarrollo del modelo heliocéntrico se enmarca en la revolución Copernicana con las leyes de movimiento planetario y la teoría de gravitación y mecánica newtoniana. La introducción de nuevos desarrollos, que cuestionan conceptos y modelos aceptados, conlleva resistencias. Si bien hay similitudes con los cambios en revoluciones sociales, los cambios de paradigma en la ciencia se dan en un contexto de análisis y evaluación y en general se construyen y fundamentan sobre los hallazgos, evidencias, hipótesis y teorías. La síntesis provista por la mecánica newtoniana se construye sobre la revolución Copernicana, a su vez basada en un acervo de observaciones, proveyendo las bases del movimiento en la Tierra y el Sistema Solar. Los avances subsecuentes sobre la estratigrafía, mineralogía, tectónica, vulcanología, registro fósil, etc consolidaron la teoría de tectónica de placas.

Las investigaciones de paleomagnetismo y tectónica continuaron y se expandieron considerablemente. Las curvas de movimiento polar aparente han sido documentadas para las diferentes masas continentales (Fig. 10), permitiendo analizar las relaciones paleogeográficas y movimientos relativos (Besse *et al.*, 1995). Los análisis de las curvas de movimiento polar en los sistemas de referencia paleomagnético y de plumas del manto permiten estimar las contribuciones de movimiento polar y las asociadas con efectos tectónicos (Besse y Courtillot, 2002). Los desarrollos instrumentales y técnicas en paleomagnetismo y magnetismo de rocas fueron cruciales en los avances iniciales y posteriores, permitiendo analizar registros paleomagnéticos en diferentes litologías, la adquisición de magnetizaciones y los procesos de remagnetización (Collinson *et al.*, 1967; Dunlop y Ozdemir, 1997).



Las revisiones sobre el desarrollo de disciplinas y campos de investigación tienen limitantes en cómo abordarlos y evitar la impresión de avances lineales ordenados o por el contrario de sesgos y contradicciones que van siendo eliminados. En general, los desarrollos son multi-factoriales, con diferentes situaciones y



Curvas de movimiento polar aparente

Figura 10. Curvas de movimiento polar aparente para Europa, Africa, Norte América, India, Antártica y Sudamérica (Besse *et al.*, 1995).

actores, que interactúan de distintas formas y en diferentes escalas espacio-temporales. En las revisiones, los aspectos interesantes incluyen identificar problemas y áreas potencialmente relevantes; ello sin embargo es particularmente difícil. En el desarrollo de deriva continental y paleomagnetismo esto es ilustrado con los comentarios y discusiones de los participantes, incluyendo las reflexiones retrospectivas (Frankel 2012). En las investigaciones sobre paleoreconstrucciones y modelos tectónicos, los avances se han dado en varios frentes, incluyendo instrumentación, computación, análisis estadísticos de datos, estratigrafía, geocronología, etc. En años recientes, los avances importantes han sido introducidos en la multidisciplinaredad de estudios, sobre tomografía sísmica del manto, simulaciones numéricas, modelos de convección, geoquímica e isotopía.

Los alcances se han ampliado con los desarrollos instrumentales, métodos de análisis de componentes de magnetización, análisis estadístico, incremento en la capacidad de computo y bases de datos y, en los nuevos sistemas de observación satelital, sistemas de posicionamiento satelital, redes instrumentales regionales y globales de sismología y geodesia, tomografía, plataformas de observación y adquisición de datos, etc. Ello ha permitido analizar los movimientos de placas, la estructura interna, las relaciones manto-litósfera, las propiedades físicas y los procesos internos con cada vez mayor resolución. Resultados de las misiones planetarias han proporcionado información sobre la estructura interna y propiedades de otros cuerpos del sistema solar y estudiar los procesos tectónicos y construcción de las superficies planetarias.



En geociencias las teorías de deriva continental y tectónica de placas representan el cambio de paradigma de una tectónica resultado de movimientos verticales a una tectónica de movimientos horizontales. La teoría de deriva continental estuvo relegada de las investigaciones en geociencias, principalmente en Norte América (Jeffreys, 1929; Frankel, 2012). En la formulación de la teoría de deriva continental, Wegner (1915, 1929) presentó una síntesis sobre los desplazamientos de las masas continentales y la configuración cambiante de océanos y continentes en el pasado geológico. En los estudios iniciales de paleomagnetismo y deriva continental, las contribuciones de J.P.S. Blackett, Stan Keith Runcorn, Ken Creer, Don H Tarling, Ted Irving, J. Zijderveld, E.C. Bullard y J. Hospers, establecieron los fundamentos de los métodos paleomagnéticos y sus aplicaciones en tectónica. Los estudios en Gondwana fueron claves para cuantificar las paleoreconstrucciones, con las investigaciones pioneras de Daniel A. Valencio, J.F. Vilas, M. McElhinny, B. Embleton, I Pacca y otros investigadores en América del Sur, Africa, Australia e India. Los estudios paleomagnéticos proveyeron los fundamentos para la confirmación de la Deriva Continental y la formulación de las teorías de la Expansión de los Fondos Oceánicos y la Tectónica de Placas. Los estudios y síntesis tectónicas proveyeron evidencias adicionales sobre la deriva continental, particularmente sobre las masas continentales del supercontinente Pangea (DuToit, 1937; Carey, 1958). El modelo tectónico de desplazamientos horizontales es el referente de explicaciones para diferentes procesos orogénicos, glaciaciones, reconstrucciones paleoclimáticas y relaciones paleobiográficas.

Agradecimientos

Estas notas forman parte de un libro sobre paleomagnetismo y tectónica preparado hace varios años. Agradecemos a la Mtra Marisol Valdés por el apoyo en la preparación del artículo.

Referencias

- Beck, M., 1980. Paleomagnetic record of plate margin tectonic process along the western edge of North America. *Journal Geophysical Research*, 85, 7115- 7131.
- Besse, J., Courtillot, V., 2002. Apparent and true polar wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr. *Journal Geophysical Research*, 107, B11, 2300.
- Besse J., Thévéniaut H., Courtillot V. (1995) Apparent polar wandering paths for North America, Europe, Africa, Laurussia and West Gondwana since the Upper Carboniferous. In: Nairn A.E.M., Ricou LE., Vrielynck B., Dercourt J. (Eds) *The Tethys Ocean*. Springer, Boston.
- Bullard, E. C., Everett, 1.E., Smith, A.G., 1965. The fit of the continents around the Atlantic. En: *A Symposium on Continental Drift, Philosophical Transactions Royal Astronomical Society*, A258, 41-51.
- Carey, S.W., 1955. Wegner´s South America-Africa assembly, fit or missfit? *Geological Magazine*, 42, 196-200.
- Carey, S.W., 1958. A tectonic approach to continental drift. En: *Continental Drift-A Symposium*, Univ. Tasmania, Hobbart, p. 177-355.
- Collinson, D., Creer, K.M., Runcorn, S.K., 1967. *Methods in Palaeomagnetism*. Elsevier, Amsterdam
- Coney, P, Jones, D.L., Monger, 1.W., 1980. Cordilleran suspect terranes. *Nature*, 288, 329-333.



- Cox, A., 1957. Remanent magnetization of Lower to Middle Eocene basalt flows from Oregon. *Nature*, 179, 685-686.
- Creer, K.M., 1958. Preliminary palaeomagnetic measurements from South America. *Annal. Geophys.*, 14, 373-390.
- Creer, K.M., Irving, E., 2012. Testing continental drift: Constructing the first paleomagnetic path of polar wander (1954). *Earth Science History*, 31, 111-145.
- Creer, K.M., Irving, E., Runcorn, S.K., 1954. The direction of the geomagnetic field in remote epochs in Great Britain. *Journal Geomagnetism Geoelectricity*, 6, 163 - 168.
- Creer, K. M., Irving, E., Runcorn, S. K., 1957. VI. Geophysical interpretation of palaeomagnetic directions from Great Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 250, 144-156.
- de Cserna, Z., 1969. Tectonic framework of southern Mexico and its bearing on the problem of continental drift. *Boletin Sociedad geologica Mexicana*, 30, 159-168.
- de Cserna, Z., 1976. Mexico – geotectonics and mineral deposits. *New Mexico Geological Society Spec. Publ.*, 6, 18-25.
- Dewey, J.F., Bird, J.M., 1970. Mountain belts and the new global tectonics. *Journal Geophysical Research*, 75, 2625-2647.
- Dietz R.S., Holden, J.C., 1970. Reconstruction of Pangea: Breakup and dispersion of continents, Permian to Present. *Journal Geophysical Research*, 75, 4939-4956.
- Du Toit, A.L., 1927. A geological comparison of South America with South Africa. Carnegie Institution, Washington.
- Du Toit, A.L., 1937. Our Wandering Continents. A Hypothesis of Continental Drifting. Oliver & Boyd, London, United Kingdom.
- Dunlop, D.J., Ozdemir, O., 1997. Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Frankel, H.R., 2012. The Continental Drift Controversy.II Paleomagnetism and Confirmation of Drift. Cambridge University Press, Cambridge, 525 pp.
- Freeland, G.L., Dietz, R.S, 1971. Plate tectonic evolution of Caribbean-Gulf of Mexico region. *Nature*, 232, 20-23.
- Glen, W., 1982. The Road to Jaramillo. Stanford University Press, Stanford.
- Gordon, R., Cox, A., O'Hare, S., 1984. Paleomagnetic Euler poles and the apparent polar wander and absolute motion of North America since the Carboniferous. *Tectonics*, 3, 499-537.
- Hess, H.H., 1962. History of Ocean Basins. En: Petrological Studies: A volume to honor AF Buddington. *Geological Society America*, 599-620.
- Holmes, A., 1944. Principles of Physical Geology. Thomas Nelson & Sons, Edinburgh.
- Irving, E., 1956. Palaeomagnetic and palaeoclimatic aspects of polar wander. *Geofisica Pura Applicata*, 33, 23-41.



- Irving, E., 1964. *Paleomagnetism and Its Application to Geological and Geophysical Problems*. Wiley & Sons, New York, 399 pp.
- Irving, E., 1979. Paleopoles and paleolatitudes of North America and speculations about displaced terrains. *Canadian Journal Earth Sciences*, 16 (3), 669-694.
- Irving, E., 1988. The paleomagnetic confirmation of continental drift. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 69 (44), 994-1014.
- Jeffreys, H., 1929. *The Earth, Its Origin, History and Physical Constitution*. Cambridge University Press, Cambridge
- Kent, D., May, S.R., 1987. *Polar wander and paleomagnetic reference pole controversies*. *Reviews Geophysics*, 25, 961-970.
- Kent, D.V., Opdyke, N. D., 1979. The Early Carboniferous paleomagnetic field of North America and its bearing on tectonics of the northern Appalachian. *Earth and Planetary Science Letters*, 44, 365-372.
- Kuhn, T.S., 1962. The Structure of Scientific Revolutions. *International Encyclopedia of Unified Science*, 2, University of Chicago Press, Chicago, 222 pp.
- LePichon, X., 1968. Sea-floor spreading and continental drift. *Journal Geophysical Research*, 73, 3661-3697.
- McDougall, I., Tarling, D.H., 1963. Dating of the polarity zones in the Hawaiian Islands. *Nature*, 200, 54-56.
- McElhinny, M.W., 1973. *Palaeomagnetism and Plate Tectonics*. Cambridge University Press, Cambridge, 358 pp.
- McElhinny, M.W., Valencio, D.A. (Eds), 1981. *Paleoreconstruction of the Continents*. *American Geophysical Union Geodynamic Series*, 2.
- Merrill, R.T., McElhinny, M.W., 1983. *The Earth's Magnetic Field: Its History, Origin and Planetary Perspective*. Academic Press, London, 401 pp.
- Morel P., Irving, E., 1981. Paleomagnetism and the evolution of Pangea. *Journal Geophysical Research*, 86, 1858-1872.
- Morgan, J.B., 1972. Plate motions and deep mantle convection. *Geological Society America Mem.* 132, 7-22.
- Morgan, W.J., 1983. Hotspots and the early rifting of the Atlantic. *Tectonophysics*, 94, p. 123-139.
- Opdyke, N.D., Henry, K.W., 1969. A test of the dipole hypothesis. *Earth Planetary Science Letters*, 6, 139-151.
- Pacca, I.G., 2014. História do Grupo de Paleomagnetismo do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas/Universidade de São Paulo (Brasil). *LatinMag Letters*, 4, LL14-0401Rv
- Pilger, R., 1978. A closed Gulf of Mexico, pre-Atlantic Ocean plate reconstruction and the early rift history of the Gulf of Mexico and North Atlantic. *Gulf Coast Association Geological Society*, 28, 385-393.
- Rapalini, A., Vilas, J.F., Bobbio, M.L., Valencio, D.A., 1989. Geodynamic interpretations from paleomagnetic data of Late Paleozoic rocks in the southern Andes. *AGU Geophysical Monograph*, 50, doi:10.1029/GM050p0041.
- Runcorn, S.K., 1956. Paleomagnetic comparisons between Europe and North America. *Proceedings*



Geological Association of Canada, 8, 77-85.

- Runcorn, S.K., 1962. Palaeomagnetic evidence for continental drift and its geophysical cause. In: Runcorn, S.K., Ed, Continental Drift, Academic Press, New York, 1-39.
- Schneider, D.A., Kent, D., 1990. The time-averaged paleomagnetic field Reviews. *Geophysics, 28, 71 -96.*
- Scotese C., Bambach, R.K., Barton, C., Van der Voo, R., Ziegler, A.M., 1979. Paleozoic base maps. *Journal Geology, 87, 217-277.*
- Silver L.T., Anderson, T.H., 1974. Possible left-lateral early to middle Mesozoic truncation of the southwestern North American craton. *Geological Society America Abstr Programs, 6, 955.*
- Simpson R.W., Cox, A., 1977. Paleomagnetic evidence for tectonic rotation of the Oregon Coast Range. *Geology, 5, 585-589.*
- Smith, AG., Hallam, A., 1970. The fit of the Southern Continents. *Nature, 225, 139-144.*
- Tarling, D.H., 1971. Gondwanaland, paleomagnetism and continental drift. *Nature, 229, 17-21.*
- Tarling, D.H., 1983 . Palaeomagnetism. Chapman and Hall, London, 379 pp.
- Urrutia, J., 1978. Cordilleran Benioff zones. *Nature, 275, 464.*
- Urrutia, J., 1979. Preliminary apparent polar wander path for Mexico. *Geophysical Journal Royal Astronomical Society, 56, 227-235.*
- Urrutia, J., 1981 . Paleomagnetic evidence for tectonic rotation of northern Mexico and the continuity of the Cordilleran orogenic belt between Nevada and Chihuahua. *Geology, 9, 178-183.*
- Urrutia, J, 1984. On the tectonic evolution of Mexico: Paleomagnetic constraints. *American Geophysical Union Geodynamics Series, 12, 29-47.*
- Urrutia, J., 2012. Early development and research in paleomagnetism and rock magnetism in Mexico- El Pozo Laboratory of Paleomagnetism and Nuclear Geophysics. *LatinMag Letters, 2, LL12-0203Rv.*
- Valencio, D.A., 1974. The South American palaeomagnetic data and the main episodes of fragmentation of Gondwana. *Physics Earth Planetary Interiors, 9, 221-225.*
- Valencio, D.A., Vilas, J.F., 1970. Palaeomagnetism of some Middle Jurassic lavas from south-east Argentina. *Nature, 225, 262-264.*
- Van der Voo, R., 1969. Paleomagnetic evidence for the rotation of the Iberian peninsula. *Tectonophysics, 7, 5-56.*
- Van der Voo, R., French, R. B., 1974. Apparent polar wandering for the Atlantic-bordering continents: Late Carboniferous to Eocene. *Earth-Science Reviews, 10, 99-119.*
- Van der Voo, R., French, R. B., 1977. Paleomagnetism of the Late Ordovician Juniata Formation and the remagnetization hypothesis. *Journal of Geophysical Research, 82, 5796-5802.*
- Van der Voo, R., Mauk, F.J., French, RB, 1976. Permian-Triassic continental configuration and the origin of the Gulf of Mexico. *Geology, 4, 177-180.*
- Van der Voo, R., Channell, JET, 1980. Paleomagnetism in orogenic belts. *Reviews Geophysics Space Physics, 18, 455-488.*
- Vilas, J.F., 2013. The birth of paleomagnetism in Latin America: Argentina. *LatinMag Letters, 3, LL13-0301Rv.*



- Vilas, J.F., Valencio DA., 1970. Palaeogeographic reconstruction of the Gondwanic continents based on palaeomagnetism and sea floor spreading. *Earth Planetary Science Letters*, 7, 397-405.
- Vine, F.J., Matthews, D.H., 1963. Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, 199, 947-949.
- Walper J.L., Rowett, C.L., 1972. Plate tectonics and the origin of the Caribbean Sea and Gulf of Mexico. Trans. *Gulf Coast Association Geological Societies*, 22, 105-116.
- Walper, J.L., 1980. Tectonic evolution of the Gulf of Mexico. En: Origin of the Gulf of Mexico and the early opening of the central North Atlantic Ocean. Baton Rouge, Louisiana State University, 87-98.
- Wegner, A., 1915. Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Friederich Vieweg Sohn.
- Wegner, A., 1929. Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. (4th Edition) Friederich Vieweg Sohn.
- Wilson, J.T., 1963. A possible origin of the Hawaiian Islands. *Canadian Journal Physics*, 41, 863-870.
- Wilson, J.T., 1965. A new class of faults and their bearing on continental drift. *Nature*, 207, 343-347.
- Wilson, JT, 1966. Did the Atlantic close and then reopen? *Nature*, 211, 676-681.
- Wilson, R.L., 1970. Permanent aspects of the Earth's non dipole magnetic field over Upper Tertiary times. *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 19, 417-437.
- Wilson, R.L., Haggerty, S.E., 1966. Reversals of the earth's magnetic field. *Endavour*, 2, 104-109.